



TITLE:

# Study on Spectral Radiation in Nonequilibrium Weakly Ionized Plasma Flow( Abstract\_要旨 )

AUTHOR(S):

Shirai, Hiroyuki

---

CITATION:

Shirai, Hiroyuki. Study on Spectral Radiation in Nonequilibrium Weakly Ionized Plasma Flow. 京都大学, 1970, 工学博士

ISSUE DATE:

1970-11-24

URL:

<http://hdl.handle.net/2433/213496>

RIGHT:

氏 名	白 井 紘 行 しら い ひろ ゆき
学 位 の 種 類	工 学 博 士
学 位 記 番 号	工 博 第 234 号
学位授与の日付	昭 和 45 年 11 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 5 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	工 学 研 究 科 航 空 工 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	<b>Study on Spectral Radiation in Nonequilibrium Weakly Ionized Plasma Flow</b> (非平衡弱電離プラズマ流におけるスペクトル輻射に関する研究)

論文調査委員 (主 査)  
教 授 神 元 五 郎 教 授 玉 田 珧 教 授 桜 井 健 郎

### 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、低密度プラズマ・ジェット風洞における、アルゴン、ヘリウムおよびアルゴン-窒素混合気体の非平衡弱電離プラズマ高速流を主として分光学的に測定し、これらのプラズマ流中における粒子衝突過程のうち、準安定アルゴン原子と自由電子との衝突による上部エネルギー準位への励起（段階的励起過程）、三体再結合と衝突輻射過程による励起（再結合励起過程）および準安定アルゴン原子と基底状態窒素分子との衝突における電子励起エネルギー移動の機構などを解析し、プラズマ流中の衝撃波前方に生ずる暗領域（ダーク・スペース）内の電子励起機構の定量的解明と、衝撃波管によるアルゴン・プラズマの緩和領域への応用などを述べたもので、緒言、三章および結論よりなっている。

緒言においては、本研究に関連して行なわれた既存の文献を展望し、この研究の意義と目的とについて述べている。

第1章では、まず実験に用いた低密度プラズマジェット風洞の構造と、アルゴンおよびヘリウムを作動気体とした場合の運転性能とについて述べ、それらの気体のプラズマ流における電子密度、電子温度などの探針測定と分光学的測定とによる実験結果を比較検討している。探針法によると、電子密度は両プラズマともに  $10^{12} \sim 10^{13}$  個/c.c で、電離度は  $10^{-3}$  程度である。分光測定によるアルゴン・プラズマの場合、電子励起温度はプレナム室において  $5,500^\circ\text{K}$  ジェット流中で  $2,500 \sim 3,500^\circ\text{K}$  で、衝撃波後方では  $3,500 \sim 4,500^\circ\text{K}$  に達し、これらの温度は探針法による電子温度とよく一致している。ヘリウム・プラズマではジェット流中で  $1,000 \sim 1,800^\circ\text{K}$  で、これらは  $2^3\text{p}-n^3\text{D}$  系の電離限界近くのスペクトル線によって測定された。

第2章では、窒素を少量加えたアルゴン・窒素混合気体のプラズマ流において準安定アルゴン原子と窒素分子との衝突による電子励起エネルギー移動の機構が取扱われている。風洞のプレナム室において少量の窒素を加えると、測定室において観測される  $\text{N}_2-2\text{nd. Positive (1.0)}$  バンド系、 $4702, 4159\text{\AA}$  の  $\text{ArI}$  などの原子系スペクトルおよび  $4700\text{\AA}$  における連続バンド・スペクトルの変化が現われ、このスペクトル

線強度の変化が、上の窒素の量の関数として測定された。この結果からジェット流中において考えられる可能な反応系のうち、準安定アルゴン原子に対する基底状態の窒素分子、自由電子および基底状態のアルゴン原子の反応等が重要な役割をしていることを解析的に明らかにした。

さらに測定室における窒素の  $N_2$ -2 nd. Positive バンド系の放射強度は準安定アルゴン原子の濃度の尺度を与え、この原子の挙動を追跡するのに極めて有効であることを示した。またプレナム室、測定室いずれにおいても、電子温度を一定に保つような範囲で加えた微量の窒素の量の変化によって、電子密度や準安定原子密度を自由に变化させることができ、さらに上記の窒素の  $N_2$ -2 nd. Positive バンド系は加えた窒素の量に対してピークをもつという特異な性質が見出された。

第3章では、ヘリウムおよびアルゴンの非平衡弱電離プラズマにおけるスペクトル放射について述べている。先づヘリウム・プラズマでは  $2^3p-n^3D$  系に属する励起状態のヘリウム原子の数密度分布が測定され、その測定結果から三体再結合と衝突放射過程とが支配的であることが明らかになった。この場合量子数が7以上の励起状態の原子は電子衝突によって自由電子と平衡にあることが観測された。そして再結合係数も衝突放射過程から計算され、この実験では  $10^{-10} \sim 10^{-9} \text{cm}^3 \cdot \text{sec}^{-1}$  の範囲にあることが示された。

つぎにアルゴン・プラズマについては、ヘリウムの場合ほどその内部エネルギー準位は簡単でないで、電子密度、電子温度、準安定原子密度に対するスペクトル線強度の依存性は、アルゴン・プラズマ流中に考えられる過程のうち、もっとも起り得る2つの励起機構を仮定して解析し、その結果を観測された結果と比較して、これらの依存性はヘリウム・プラズマの場合と同様、三体再結合と衝突放射過程とによるものであることが確認された。このモデルは衝撃波による高温電離アルゴン・プラズマにも適用され、アルゴンの原子線スペクトル強度の観測された時間履歴と測定された電子密度、電子温度とから計算された時間履歴とは、衝撃波前線下流の緩和領域全体に互ってよく一致することが示された。

さらに、アルゴン・プラズマ流を一次元定常流れの仮定の下に、三体再結合によるエネルギー項を含む電子のエネルギー式を、衝撃波上流の暗領域において、上記のモデルによる電子温度のスペクトル線強度に対する依存性を用いて解析し、電子温度をスペクトル線強度分布に換算した結果は実測値とよく一致し、Grewal らの暗領域に対する定性的な説明を定量的に解明するなどの応用面について述べている。

結論は、以上の総括である。

## 論文審査の結果の要旨

非平衡弱電離プラズマ高速流における強い放射とそれに伴う諸現象は、単純な熱衝突現象では説明できない複雑な機構を持っている。これらを解明するには、プラズマ流における微視的な励起過程や放射の機構を考察しなければならない。本論文は、これらの励起過程や放射の機構を解析し、衝撃波前方に生ずる暗領域の成因を解明したもので、得られた多くの成果のうち特に次の3つの点が注目される。

第1に、プラズマ流において支配的な役割りを果たす種々の粒子の追跡法を考える必要がある。自由電子、基底状態のアルゴン原子などについては、追跡は比較的容易であるが、問題は従来の研究で殆ど無視されてきた準安定アルゴン原子の追跡法である。このために準安定原子の励起エネルギーとエネルギー共鳴状態に近い基底状態の窒素分子  $N_2$  ( $C^3\pi$ ) に注目して、プラズマ内に微量の窒素を加え、窒素分子の基底状

態から生じる  $N_2-2\text{nd. Positive}$  バンド系のスペクトル強度を測定した。従来  $N_2-Ar$  系のプラズマにおける電子的エネルギー移動についての研究は少なく、本実験によってこの現象には準安定アルゴン原子の寄与が無視できないことを確認し、プラズマ流中において予想されるいくつかの反応式をたて、それらの式から得られるスペクトル放射強度と観測値とが一致するように解析した結果、 $N_2-2\text{nd. Positive}$  系のスペクトル強度と準安定原子濃度との間の関係を求めることができた。

第2に、アルゴン・プラズマの場合、その内部エネルギー準位はヘリウムに比べて複雑であるので、ヘリウム・プラズマの場合における放射の機構から類推して、アルゴン・プラズマ流中におこり得ると思われる反応過程のうち、段階的励起過程と再結合励起過程の2つが支配的であると仮定し、おのおのの過程に対応して理論的にスペクトル放射の電子温度、電子密度あるいは準安定原子濃度に対する依存性を求め、電子密度、準安定原子数密度に対する依存性は、上述の窒素の添加法により測定し、電子温度に対する依存性は以下の暗領域の問題と関連させて、実験結果と比較検討した結果、上述の2つの過程が支配的であることが確認された。

第3に、非平衡弱電離プラズマ高速流中の衝撃波前方の暗領域はアルゴンの場合ごく最近実験的に見出され、ヘリウムの場合はこの実験において報告されたばかりで、その成因についての理論的取扱いはまだ行なわれていない。この成因はプラズマ流における上述の反応過程を用い、衝撃波構造については準安定原子の存在を考慮した計算を行ない、この暗領域における放射スペクトル強度を定量的に解析し、実験結果と比較した結果、ヘリウムの場合にはやや差があるが、アルゴンの場合は殆ど完全に一致し、暗領域の成因を定量的に解明することができた。

以上要するに、この論文はアルゴンとヘリウムの非平衡弱電離プラズマ高速流における放射機構および、衝撃波前方の暗領域の成因を定量的に解明したもので、学術上は勿論実際上にも多くの有益な知見を与えるものである。

よって、本論文は工学博士の学位論文として価値あるものと認める。